

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Desenvolvimento e Inovação Tecnológica

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Prof^ª Dr^ª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof^ª Dr^ª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^ª Dr^ª Ivone Goulart Lopes – Instituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^ª Dr^ª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Prof^ª Dr^ª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof^ª Dr^ª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^ª Dr^ª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^ª Dr^ª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^ª Dr^ª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^ª Dr^ª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof^ª Dr^ª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Prof^ª Dr^ª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof^ª Dr^ª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Prof^ª Dr^ª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof^ª Dr^ª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília

Prof^ª Dr^ª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás

Prof^ª Dr^ª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Prof^ª Dr^ª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof^ª Dr^ª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof^ª Dr^ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª Dr^ª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra

Prof^ª Dr^ª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras

Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Prof^ª Dr^ª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco

Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas

Prof^ª Dr^ª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof^ª Dr^ª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof^ª Dr^ª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados

Prof^ª Dr^ª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof^ª Dr^ª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof^ª Dr^ª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^ª Dr^ª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof^ª Dr^ª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^ª Dr^ª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^ª Dr^ª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof^ª Dr^ª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof^ª Dr^ª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^ª Dr^ª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Prof^ª Dr^ª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Prof^ª Dr^ª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Prof^ª Dr^ª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^ª Dr^ª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^ª Dr^ª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Prof^ª Dr^ª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof^ª Dr^ª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof^ª Dr^ª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof^ª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof^ª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Prof^ª Dr^ª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof^ª Dr^ª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Prof^ª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Prof^ª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Prof^ª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar

Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR

Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^ª Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Ma. Liliansi Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Prof^ª Dr^ª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Prof^ª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Prof^ª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^ª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Prof^ª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Prof^ª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof^ª Dr^ª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Prof^ª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Prof^ª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Prof^ª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof^ª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Prof^ª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Maria Alice Pinheiro
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia elétrica: desenvolvimento e inovação tecnológica / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5706-773-4
DOI 10.22533/at.ed.734212202

1. Engenharia elétrica. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa.

APRESENTAÇÃO

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

METODOLOGIA PARA TESTE E CLASSIFICAÇÃO DE SMART METERS PARA APLICAÇÕES EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Luiz Henrique Leite Rosa
Renan Corrêa de Moura
Marcio Ribeiro Cruz
Carlos Frederico Meschini Almeida
Nelson Kagan
Alexandre Dominice

DOI 10.22533/at.ed.7342122021

CAPÍTULO 2..... 13

ESTUDO COMPARATIVO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES

Pedro Henrique Camargos
Ricardo Elias Caetano
Marcel Fernando da Costa Parentoni

DOI 10.22533/at.ed.7342122022

CAPÍTULO 3..... 25

COMO ATENUAR EMI EM SISTEMAS AUTOMATIZADOS

Rogério Martins de Souza

DOI 10.22533/at.ed.7342122023

CAPÍTULO 4..... 39

MODELO MATEMÁTICO DE UMA TURBINA A GÁS DE 106 MW DE TIPO INDUSTRIAL COM UM ÚNICO EIXO

Manuel Arturo Rendón Maldonado
André Reinaldo Novgorodcev Júnior

DOI 10.22533/at.ed.7342122024

CAPÍTULO 5..... 54

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS - UMA ABORDAGEM USANDO SAMPLED VALUES

Matheus Felipe Ayello Leite
Arthur Augusto Pereira Cruz
Angelo Cesar Colombini
Márcio Zamboti Fortes
Yona Lopes

DOI 10.22533/at.ed.7342122025

CAPÍTULO 6..... 71

O USO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS DIANTE DAS RECLAMAÇÕES POR DANOS ELÉTRICOS NO BRASIL

Lívy Wana Duarte de Souza Nascimento
Lilian de Fátima Costa Santos

Roberto Akira Yamachita
Jamil Haddad
Rodolfo Esmarady Rocha dos Santos
Neiva Beatriz Ferreira Silva Vicentin
Carlos Alberto Froés Lima

DOI 10.22533/at.ed.7342122026

CAPÍTULO 7..... 83

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DO HOSPITAL DE CLÍNICAS DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO**

Álvaro Ribeiro Gomes de Oliveira
Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior
Nivaldo Leite da Silva Júnior

DOI 10.22533/at.ed.7342122027

CAPÍTULO 8..... 97

**ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS: OPERAÇÃO E MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE
PROGRAMÁVEL**

Cássio Alves de Oliveira
Josemar Alves dos Santos Junior
Marcos José de Moraes Filho
Vinícius Marcos Pinheiro
Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira
Luciano Coutinho Gomes

DOI 10.22533/at.ed.7342122028

CAPÍTULO 9..... 112

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA PARA PREVISÃO DE POTÊNCIA
MÁXIMA EM SUBESTAÇÕES UTILIZANDO REDES NEURAIS**

Thommas Kevin Sales Flores
Pedro Henrique Meira de Andrade
Isaac Emmanuel Azevedo de Medeiros
Juan Moises Mauricio Villanueva

DOI 10.22533/at.ed.7342122029

CAPÍTULO 10..... 126

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CURTO-CIRCUITOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA
DISCRETA FRACIONÁRIA DE FOURIER E REDE NEURAL ARTIFICIAL**

Leonardo Audalio Ferreira do Nascimento
Viviane Barrozo da Silva Duarte Ricciotti
Antônio Carlos Duarte Ricciotti
Adailton Braga Júnior
Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira
Júlio César Ribeiro

DOI 10.22533/at.ed.73421220210

CAPÍTULO 11	138
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DA COBERTURA DE APLICAÇÃO DE DEFENSIVO AGRÍCOLA USANDO MARCADORES ULTRAVIOLETA	
Edson d'Avila Antônio Carlos Loureiro Lino Inácio Maria Dal Fabbro Ana Cristina da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.73421220211	
CAPÍTULO 12	149
MODELAGEM E CONTROLE DE UM HELICÓPTERO DE BANCADA COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE	
Matheus Sachet Rômulo Lira Milhomem	
DOI 10.22533/at.ed.73421220212	
CAPÍTULO 13	169
ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE ESTUFAS HIDROPÔNICAS INTEGRADAS À IOT PARA FINS RESIDENCIAIS	
Rogério Luis Spagnolo da Silva Renan Pinho Lucas Ramalho Paiva Jorge Augusto Igor Falla Henrique Alvarez	
DOI 10.22533/at.ed.73421220213	
CAPÍTULO 14	183
SEGMENTAÇÃO DE EXUDATOS DUROS USANDO LIMIAÇÃO ADAPTATIVA E CRESCIMENTO DE REGIÕES	
Rafael de Freitas Brito Milena Bueno Pereira Carneiro Cristiane de Fátima dos Santos Cardoso	
DOI 10.22533/at.ed.73421220214	
CAPÍTULO 15	192
MICROGRID SYSTEM DESIGN BASED ON MODEL BASED SYSTEMS ENGINEERING: THE CASE STUDY IN THE AMAZON REGION	
Miguel Angel Orellana Postigo José Reinaldo Silva	
DOI 10.22533/at.ed.73421220215	
CAPÍTULO 16	208
ESTUDO COMPLEMENTAR DO USO DE UMA FONTE RESSONANTE PARA TESTES EXPERIMENTAIS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM NÍVEIS DE MÉDIA TENSÃO	
André Pinto Leão Maria Emília Lima Tostes João Paulo Abreu Vieira	

Ubiratan Holanda Bezerra
Marcelo Costa Santos
Ádrea Lima de Sousa
Wesley Rodrigues Heringer
Murillo Augusto Melo Cordeiro
Juan Carlos Huaquisaca Paye
Lucas de Paula Assunção Pinheiro

DOI 10.22533/at.ed.73421220216

CAPÍTULO 17.....224

**FERRAMENTAS DE PROTOTIPAÇÃO APLICADAS A SISTEMAS DE POTÊNCIA:
MATLAB VERSUS PYTHON**

Luciano de Oliveira Daniel
Sergio Luis Varricchio

DOI 10.22533/at.ed.73421220217

CAPÍTULO 18.....240

**SENSIBILIDADES DE POLOS E ZEROS EM RELAÇÃO AO COMPRIMENTO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO REPRESENTADAS PELO MODELO DE BERGERON**

Sergio Luis Varricchio
Cristiano de Oliveira Costa

DOI 10.22533/at.ed.73421220218

CAPÍTULO 19.....256

**UTILIZAÇÃO DE SIMULADORES EM CENÁRIOS DE REDES ÓPTICAS COM
MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO ESPACIAL**

Eloisa Bento Sarmento
Mariana Gomes Costa
Gileno Bezerra Guerra Junior
Helder Alves Pereira

DOI 10.22533/at.ed.73421220219

CAPÍTULO 20.....264

**PROJETO E ANÁLISE DE UM ARRANJO LINEAR DE ANTENAS DE MICROFITA QUASE-
FRACTAL UTILIZANDO A CURVA DE MINKOWSKI NÍVEL 2 COM APLICAÇÕES EM
REDES DE COMUNICAÇÃO SEM FIO**

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira
Pedro Carlos de Assis Júnior
Relber Antônio Galdino de Oliveira

DOI 10.22533/at.ed.73421220220

CAPÍTULO 21.....277

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DAS IMPRECIÇÕES NUMÉRICAS
RESULTANTES DA UTILIZAÇÃO DE FILTROS COM ARITMÉTICA INTEIRA**

Daniel Carrijo Polonio Araujo
Gabriel de Souza Pereira Gomes
Christos Aristóteles Harissis
Rogério Andrade Flauzino

DOI 10.22533/at.ed.73421220221

CAPÍTULO 22	298
TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE CORRENTE NULA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES BOOST OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO CRÍTICA	
Marcelo Nogueira Tirolli	
Alexandre Borges Marcelo	
Flávio Alessandro Serrão Gonçalves	
DOI 10.22533/at.ed.73421220222	
CAPÍTULO 23	312
A STAIRWAY STATISTICAL NEURAL MODEL FOR DGA ANALYSIS	
Gabriel de Souza Pereira Gomes	
Daniel Carrijo Polonio Araujo	
Mateus Batista de Moraes	
Rafael Prux Fehlberg	
Murilo Marques Pinto	
Arthur Franklim Marques de Campos	
Marcos Eduardo Guerra Alves	
Rogério Andrade Flauzino	
DOI 10.22533/at.ed.73421220223	
CAPÍTULO 24	325
LATÊNCIA NA COMUNICAÇÃO PARA ESQUEMAS DE TELEPROTEÇÃO: REQUISITOS, AVALIAÇÕES E MEIOS DE TRANSMISSÃO	
Mayara Helena Moreira Nogueira dos Santos	
Matheus Felipe Ayello	
Paulo Henrique Barbosa de Souza Pinheiro	
André da Costa Pinho	
Angelo Cesar Colombini	
Márcio Zamboti Fortes	
Yona Lopes	
DOI 10.22533/at.ed.73421220224	
SOBRE OS ORGANIZADORES	343
ÍNDICE REMISSIVO	344

ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS: OPERAÇÃO E MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE PROGRAMÁVEL

Data de aceite: 04/02/2021

Data de submissão: 05/11/2020

Cássio Alves de Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Uberlândia – MG
<http://lattes.cnpq.br/6920155455622196>

Josemar Alves dos Santos Junior

Instituto Federal de Goiás (IFG)
Itumbiara – GO
<http://lattes.cnpq.br/1025232999499749>

Marcos José de Moraes Filho

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Uberlândia – MG
<http://lattes.cnpq.br/3284685986290204>

Vinícius Marcos Pinheiro

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Uberlândia – MG
<http://lattes.cnpq.br/8748537162782615>

Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Uberlândia – MG
<http://lattes.cnpq.br/0283876707718262>

Luciano Coutinho Gomes

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Uberlândia – MG
<http://lattes.cnpq.br/3372531394380706>

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo fundamentado em norma técnica para avaliar o rendimento de motores de

indução trifásicos. Os ensaios foram efetuados em uma plataforma experimental, que permite a análise de motores de até 5 cv. O monitoramento e a aquisição de dados foram realizados com precisão e confiabilidade utilizando uma fonte programável, o que possibilitou a elaboração de ensaios reproduzindo diversas situações operacionais.

PALAVRAS - CHAVE: Ensaios, rendimento, normas técnicas, motor de indução trifásico.

TESTS OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR EFFICIENCY EVALUATION: OPERATION AND MONITORING WITH PROGRAMMABLE POWER SOURCE ASSISTANCE

ABSTRACT: This paper presents a study based on technical standards to evaluate the efficiency of three-phase induction motors. The tests were carried out on an experimental platform that was designed for the analysis of motors until 5 cv. Monitoring and data acquisition were obtained with precision and reliability using a programmable power supply, which made possible the realization of tests reproducing several operational situations.

KEYWORDS: Tests, efficiency, technical standards, three-phase induction motor.

1 | INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são essenciais nos processos industriais, uma vez que movimentam todo tipo de máquinas e equipamentos. Estima-se que, no mundo, existam mais de 300

milhões de motores, que consomem cerca de 7400 Terawatt-hora (TWh), o equivalente a aproximadamente 40% da produção mundial de energia elétrica (WEG,2017). O motor de indução trifásico (MIT) é considerado o principal equipamento de transformação de energia elétrica em energia mecânica motriz (Godoy et al,1016) e diversos motivos o tornam uma escolha viável: é uma máquina robusta, de baixo custo, fácil manutenção, elevada eficiência e adaptável a variadas situações de carga.

Os motores de indução trifásicos adotam um simples, mas inteligente e eficiente sistema de conversão eletromecânica de energia. No MIT com rotor em gaiola de esquilo, o qual constitui a vasta maioria das máquinas de indução, o rotor é inacessível. Contatos móveis, tais como o comutador e as escovas das máquinas de corrente contínua ou anéis deslizantes e as escovas nos motores e geradores síncronos não são necessários. Este arranjo eleva consideravelmente a confiabilidade dos motores de indução e elimina o risco de centelhas, permitindo que motores desse tipo sejam utilizados com segurança em ambientes agressivos, como em áreas contendo atmosfera potencialmente explosiva. Este robusto rotor pode girar em elevadas rotações e suportar grandes sobrecargas mecânicas e elétricas (Bulgarelli, 2006).

Os motores elétricos de indução possuem o rendimento influenciado por vários fatores. O superdimensionamento provoca aumento no percentual de perdas em relação ao valor nominal, o que determina uma queda no rendimento (Silva, 2012). Alinhamento inadequado de eixo e reparos executados de forma incorreta também podem alterar o valor do rendimento dessas máquinas (Silva, 2012). Motores que já foram rebobinados pelo menos uma vez não possuem mais as características elétricas e mecânicas originais. Tais máquinas podem ter sua eficiência comprometida, vida útil menor e gasto energético excessivo. A realização de ensaios laboratoriais é recomendada para que suas grandezas elétricas e mecânicas sejam verificadas (Rezende e Bispo, 2015).

A necessidade crescente de busca por processos mais econômicos, com utilização racional e eficiente da energia elétrica, tem implicado na realização de estudos detalhados para a otimização dos processos industriais (Silva, 2007). As indústrias têm se esforçado para otimizar o tempo de operação dos processos produtivos. Dessa forma, a identificação e correção de problemas elétricos e mecânicos associados às máquinas de indução são fundamentais para a elevação dos níveis de confiabilidade do sistema e para o aumento da capacidade operacional.

O uso de motores eficientes pode reduzir as perdas de carga, já que menor eficiência leva a custos operacionais mais elevados. Dessa forma, testes precisos e confiáveis de motores são essenciais. Para medir com precisão a eficiência do motor, é necessário calcular as perdas e verificar parâmetros de projeto como, por exemplo, corrente, tensão, potência etc. (Izhar, Ali e Nazir, 2017).

Visando contribuir com a análise do funcionamento do MIT em situações que se aproximam daquelas encontradas em aplicações reais, a proposta do presente trabalho

é avaliar o desempenho do motor em uma plataforma que utiliza uma fonte programável, permitindo a aquisição de dados e o monitoramento do funcionamento, objetivando a realização de ensaios estabelecidos em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

2 | NORMAS TÉCNICAS

Segundo a definição internacional, uma norma é um “documento estabelecido por consenso e aprovado por um organismo reconhecido, que fornece, para uso comum e repetitivo, regras, diretrizes ou características para atividades ou seus resultados, visando à obtenção de um grau ótimo de ordenação em um dado contexto”. A esta definição pode-se acrescentar a recomendação de que “convém que as normas sejam baseadas em resultados consolidados da ciência, tecnologia e da experiência acumulada, visando à otimização de benefícios para a comunidade”.

Em outras palavras as normas técnicas fornecem especificações de classe mundial para produtos, serviços e sistemas com o propósito de garantir qualidade, segurança e eficiência. Uma norma é, por princípio, de uso voluntário, mas quase sempre é utilizada por representar o consenso sobre o estado da arte de determinado assunto, obtido entre especialistas das partes interessadas.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas é responsável pela elaboração das Normas Brasileiras (ABNT NBR), elaboradas por seus Comitês Brasileiros (ABNT/CB), Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE). A norma que prescreve ensaios aplicáveis para a determinação das características de desempenho de motores de indução é a NBR 17094, que é dividida em quatro partes:

- Parte 1: Motores de indução trifásicos – Requisitos;
- Parte 2: Motores de indução monofásicos – Requisitos;
- Parte 3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio;
- Parte 4: Motores de indução monofásicos – Métodos de ensaios.

Procedimentos e normas devem ser seguidos para garantir o bom funcionamento dos motores e a segurança do pessoal envolvido na operação, evitando possíveis danos pessoais e/ou materiais.

3 | O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

3.1 Aspectos Construtivos

O funcionamento dos motores elétricos está associado à interação de forças de origem eletromagnética entre uma parte fixa, o estator da máquina, e uma parte móvel, chamada de rotor.

O estator de um MIT é estruturado utilizando-se um material ferromagnético laminado e com ranhuras para armazenar o enrolamento. As lâminas são isoladas para minimizar os efeitos das correntes parasitas e o enrolamento é trifásico, formado por três bobinas defasadas, entre si, de 120° .

A parte móvel do motor de indução pode ser do tipo rotor bobinado ou do tipo gaiola de esquilo.

Um rotor bobinado possui um conjunto completo de enrolamentos trifásicos que são similares aos enrolamentos do estator. As terminações das três fases dos enrolamentos são conectadas a anéis deslizantes no eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por meio de escovas que se apoiam nos anéis deslizantes. As correntes que circulam no rotor podem ser acessadas por meio das escovas e resistências externas podem ser inseridas no circuito para modificar a característica de conjugado *versus* velocidade do motor (Chapman, 2013). Os motores de indução de rotor bobinado são utilizados apenas em aplicações específicas, pois exigem mais manutenção devido ao desgaste associado às escovas e aos anéis deslizantes, além do fato de serem mais caros.

O rotor em gaiola de esquilo contém uma série de barras condutoras que estão encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor e colocadas em curto-circuito por anéis condutores em ambas as extremidades. É o tipo de rotor mais utilizado na fabricação de máquinas de indução por possuir vantagens notáveis, como a simplicidade e a robustez na sua construção.

3.2 Circuito Equivalente

O motor de indução é chamado de máquina de excitação simples, uma vez que a potência é fornecida apenas ao circuito de estator. Portanto, o circuito equivalente de um MIT pode ser obtido empregando-se a teoria de transformadores e introduzindo as modificações necessárias para considerar o fato de que o circuito do rotor opera em frequência diferente daquela do estator em função da diferença de velocidade entre o rotor e o campo magnético produzido no estator.

Todos os parâmetros do circuito equivalente são expressos por fase, independentemente do tipo de ligação (estrela ou delta), partindo do pressuposto de que o enrolamento é simétrico e a máquina é alimentada com tensões trifásicas equilibradas. A determinação dos valores dos parâmetros do circuito equivalente pode ser feita através de um ensaio em vazio, de um ensaio com rotor bloqueado e das medições das resistências

CC dos enrolamentos do estator. O circuito equivalente monofásico de um MIT é mostrado na Figura 1.

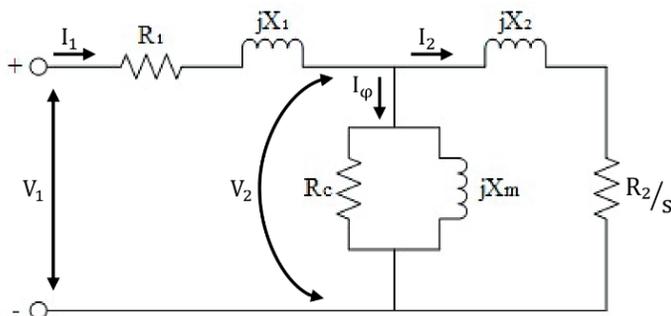


Figura 1 – Circuito equivalente monofásico de um MIT.

Os parâmetros do circuito da Figura 1 são definidos da seguinte forma:

- R_1 : Resistência efetiva do estator;
- X_1 : Reatância de dispersão do estator;
- R_c : Resistência de perdas no núcleo;
- X_m : Reatância de magnetização;
- R_2 : Resistência do rotor;
- X_2 : Reatância de dispersão do rotor;
- s : escorregamento.

3.3 Fluxo de Potência e Perdas

O estator do MIT recebe da rede elétrica a potência de entrada, que será convertida em potência mecânica de saída, que é a potência fornecida no eixo da máquina. Caso toda a potência de entrada fosse transferida ao eixo, a eficiência da transformação seria de 100%. Entretanto, em qualquer sistema de transformação, parte da energia é dissipada, o que implica em perda de potência. As perdas definem o rendimento da máquina e influenciam de forma significativa no seu funcionamento.

O rendimento de um motor de indução trifásico pode ser definido como sendo a relação entre a potência de saída e a potência de entrada. A potência de saída é obtida subtraindo-se a potência de entrada das perdas internas. Consequentemente, se duas dessas três variáveis (potência de saída, potência de entrada ou perdas) forem conhecidas, o rendimento poderá ser determinado da seguinte forma:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{entrada} - P_{perdas}}{P_{entrada}} \quad (1)$$

$$\eta_{\%} = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{perdas}} \quad (2)$$

Em um motor de indução, as perdas são separadas em fixas e variáveis, sendo que estas últimas dependem do percentual de carga no eixo da máquina. As primeiras perdas encontradas são as perdas nos enrolamentos do estator. Ainda no estator, certa quantidade de potência é perdida no ciclo de histerese e em função de correntes parasitas. A potência remanescente é transferida ao rotor da máquina através do entreferro. Após a transferência, parte da potência é eliminada nos condutores do rotor e o restante é convertido da forma elétrica para a forma mecânica. Por fim, as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares são subtraídas e a potência restante é a potência de saída do motor. A Figura 2 mostra o fluxo de potência através do MIT.

As perdas no núcleo de um MIT são parcialmente provenientes do circuito do estator e parcialmente do circuito do rotor. Como o motor de indução funciona normalmente com uma velocidade próxima da velocidade síncrona, o movimento relativo dos campos magnéticos sobre a superfície do rotor é muito lento e as perdas no núcleo do rotor são muito pequenas se comparadas com as perdas no núcleo do estator (Chapman, 2013).

Atualmente, motores de indução de alto rendimento são produzidos e diversas técnicas são utilizadas para aumentar a eficiência desses motores em comparação com os motores tradicionais. A colocação de maior quantidade de aço e de cobre na construção do estator, o aumento do comprimento dos núcleos do estator e do rotor e o cuidado para a formação de um entreferro uniforme são algumas das estratégias que permitem a redução das perdas e, conseqüentemente, a elevação da eficiência.

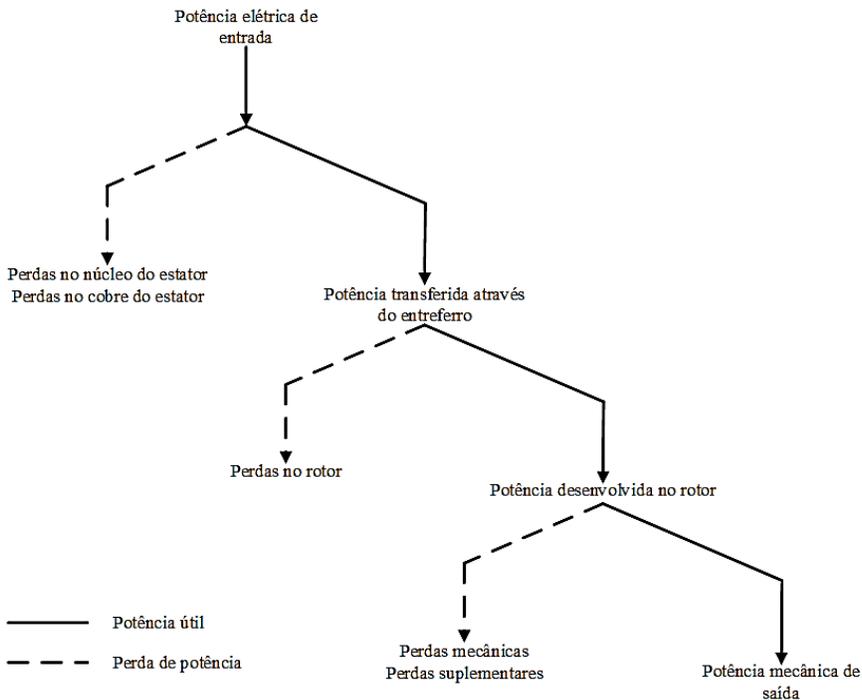


Figura 2 – Diagrama de fluxo de potência através do MIT.

4 | METODOLOGIA UTILIZADA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 A Plataforma de Ensaios

A plataforma experimental, apresentada na Figura 3, foi desenvolvida de forma a viabilizar a análise do desempenho de motores de indução trifásicos por meio de ensaios diversos. Com a finalidade de facilitar a manipulação de todos os equipamentos necessários à realização dos trabalhos, toda a planta foi acomodada em uma bancada que conta com os principais dispositivos de proteção contra eventuais falhas que pudessem ocorrer durante a realização dos ensaios.

A plataforma conta com uma fonte programável, desenvolvida pela AMETEK Programmable Power. É um equipamento de alta eficiência que fornece uma saída precisa, com baixa distorção. O modelo CSW5550 da marca California Instruments permite conexão em paralelo com até oito módulos do mesmo modelo para aumentar a potência de saída. O dispositivo possui ainda as interfaces remotas GPIB, RS232 e USB.

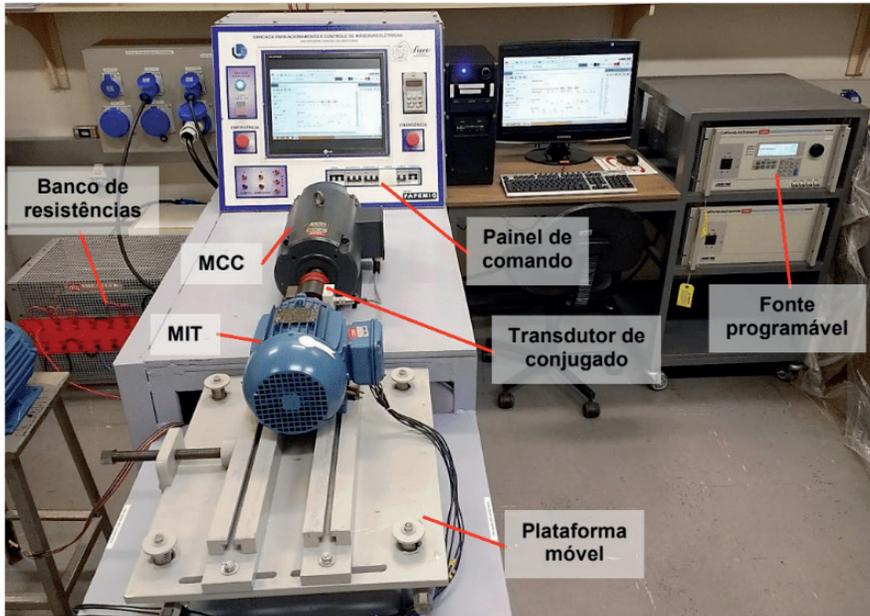


Figura 3 – A plataforma de ensaios.

A leitura de dados é mostrada no *display* do painel frontal da fonte programável ou por meio da tela do *software*. Além disso, a fonte dispõe também de opções para armazenar os dados de leitura em arquivo de texto com possibilidade de configuração do intervalo de tempo para atualização desses dados, à medida em que os ensaios vão sendo realizados. A Figura 4 apresenta uma das telas de leitura de dados do *software* da fonte programável.

Na plataforma de ensaios, o motor de indução trifásico será acionado através da fonte programável e a carga mecânica acoplada ao eixo será uma máquina de corrente contínua (MCC). As principais características do MIT sob ensaio são apresentadas na Tabela 1.

<input checked="" type="checkbox"/> VOLTAGE (VRMS) $\varnothing A$ $\varnothing B$ $\varnothing C$ 127 127 127	<input checked="" type="checkbox"/> CURRENT (ARMS) $\varnothing A$ $\varnothing B$ $\varnothing C$ 4.31 4.43 4.31
<input checked="" type="checkbox"/> PHASE (Φ) $\varnothing A$ $\varnothing B$ $\varnothing C$ 0 240.3 120.5	<input checked="" type="checkbox"/> POWER (KW) $\varnothing A$ $\varnothing B$ $\varnothing C$ 0.08 0.08 0.07
<input checked="" type="checkbox"/> APPT.POWER (KVA) $\varnothing A$ $\varnothing B$ $\varnothing C$ 0.547 0.563 0.547	<input checked="" type="checkbox"/> POWER FACTOR $\varnothing A$ $\varnothing B$ $\varnothing C$ 0.15 0.14 0.13
<input checked="" type="checkbox"/> PEAK CURRENT (A) $\varnothing A$ $\varnothing B$ $\varnothing C$ 6.1 6.35 6.12	<input checked="" type="checkbox"/> CREST FACTOR $\varnothing A$ $\varnothing B$ $\varnothing C$ 1.41 1.43 1.42
<input checked="" type="checkbox"/> FREQUENCY 60	LINE TO LINE VOLTAGES $V_{AC(L-L)}$ $V_{AB(L-L)}$ $V_{BC(L-L)}$ 219,97 219,97 219,97

Figura 4 – Interface de leitura de dados do *software* da fonte programável.

Motor de indução trifásico – Rotor em gaiola	
Fabricante	WEG
Potência de saída	2,2 (3,0) kW (cv)
Tensão	220 / 380 V
Corrente	8,39 / 4,86 A
Frequência	60 Hz
Velocidade mecânica	3450 rpm – 2 polos
Rendimento	81,9%
Fator de potência	0,84
Categoria	N

Tabela 1 – Características do MIT sob ensaio.

4.2 Ensaio para Determinação do Rendimento

De acordo com a NBR 17094-3:2018, o rendimento deve ser determinado para tensão e frequência nominais, a não ser quando especificado de forma diferente. A norma lista dez métodos que podem ser utilizados para a realização do ensaio, sendo que, para este trabalho, o método 5 foi escolhido por ser o que mais se adequa às características da plataforma experimental.

O método 5 consiste na medição da potência de entrada, sendo que a potência de saída é obtida subtraindo-se as perdas totais da potência de entrada. As perdas totais representam o somatório das perdas $I^2 R$ no estator e no rotor corrigidas para uma temperatura especificada para a correção da resistência, das perdas no núcleo, das perdas por atrito e ventilação e das perdas suplementares.

Quando se utiliza o método 5, a perda suplementar é determinada de acordo com a Tabela 2 para carga nominal. Para outro ponto que não seja o de carga nominal, deve-se admitir que a perda suplementar é proporcional à corrente do rotor ao quadrado:

$$P_{sup} = P'_{sup} \cdot \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 \quad (3)$$

Onde:

P_{sup} – Valor da perda suplementar para um ponto de carga diferente do nominal.

P'_{sup} - Valor da perda suplementar correspondente ao valor da corrente .

I_2 – Corrente do rotor apropriada ao ponto de carga para o qual a perda suplementar é para ser determinada.

I'_2 - Valor da corrente do rotor correspondente à carga nominal.

Potência nominal do motor		Perda suplementar (porcentagem da potência de saída nominal)
kW	cv	
0,75 - 90	1 - 125	1,8
91 - 375	126 – 500	1,5
376 - 1839	501 – 2499	1,2
1840 e acima	2500 e acima	0,9

Tabela 2 – Valores assumidos de perda suplementar.

Os procedimentos para a realização do ensaio para a determinação do rendimento são os seguintes:

- Fazer um ensaio em vazio;
- Fazer um ensaio em carga. Para obter os dados necessários é preciso acoplar o motor a um sistema de carga variável. Para cada um dos pontos de carga, medir a potência de entrada, a corrente de linha, a tensão aplicada, a velocidade, a temperatura ambiente e a resistência ou a temperatura do enrolamento do estator;
- Determinar a perda $I^2 R$ no estator;
- Determinar a perda $I^2 R$ no rotor;

- Determinar a perda no núcleo;
- Determinar a perda por atrito e ventilação;
- Calcular a corrente do rotor correspondente a cada ponto de carga;
- Calcular a perda suplementar para cada ponto de carga;
- Determinar o rendimento para cada ponto de carga.

A realização do ensaio em vazio permite que sejam estabelecidas a perda no núcleo e a perda por atrito e ventilação, perdas essas que são as únicas classificadas como perdas fixas.

O ensaio com carga deve ser efetuado para pontos de carga aproximadamente igualmente espaçados e em ordem decrescente, conforme recomenda a NBR 17094-3:2018. Foram escolhidos os pontos em 140%, 125%, 100%, 75% e 50%. A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio com carga.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Potência de entrada (kW)	3,803	3,442	2,732	1,803	0,853
Corrente de linha (A)	11,356	10,530	8,738	6,613	4,908
Tensão de linha (V)	219,95	219,95	219,95	219,95	219,95
Velocidade (rpm)	3275	3340	3432	3508	3564
Temperatura ambiente (°C)	25	25	25	25	25
Resistência do estator (Ω)	3,75	3,45	3,15	2,85	2,55

Tabela 3 – Resultados do ensaio com carga variável.

As perdas I^2R no estator são calculadas para cada ponto de carga, utilizando os valores de corrente de linha e da resistência do estator que constam na Tabela 3.

Para determinar as perdas I^2R no rotor é necessário inicialmente calcular o escorregamento para cada ponto de carga, aplicando os valores de velocidade da Tabela 3 na equação:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4)$$

Onde:

s – Escorregamento.

n_s – Velocidade síncrona.

n – Velocidade de rotação do rotor ou velocidade mecânica.

Uma vez calculado o escorregamento, as perdas no rotor são definidas da seguinte forma:

$$P_{rotor} = (P_{entrada} - P_{estator} - P_{núcleo}) \cdot s \quad (5)$$

Onde:

P_{rotor} – Perda no rotor.

$P_{estator}$ – Perda no estator.

$P_{núcleo}$ – Perda no núcleo.

Para efetuar o cálculo da perda suplementar, é preciso antes conhecer o valor da corrente do rotor para cada ponto de carga, o que pode ser determinado pela equação:

$$I_2 = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (6)$$

Onde:

I_2 – Corrente do rotor.

I – Corrente do estator apropriada para a qual a perda suplementar está sendo determinada.

I_0 – Corrente do estator em vazio.

Utilizando a Tabela 2 é possível encontrar o valor da perda suplementar à carga nominal. Para os demais pontos de carga, basta aplicar as equações (6) e (3).

Após a realização dos ensaios, os valores de todas as perdas internas do motor ensaiado foram calculados para cada ponto de carga e são apresentados na Tabela 4. Com os valores de todas as perdas disponíveis, pode-se utilizar a equação (1) para o cálculo do rendimento. O resultado é apresentado na Tabela 5.

Analisando os resultados das Tabelas 4 e 5, é possível verificar que as perdas I^2R no estator e no rotor e as perdas suplementares influenciam significativamente no valor do rendimento.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Perda I^2R no estator (W)	483,595	382,539	240,511	124,636	61,426
Perda no núcleo (W)	95,196	95,196	95,196	95,196	95,196
Perda I^2R no rotor (W)	291,074	214,086	111,827	40,459	6,964
Perda por atrito e ventilação (W)	90	90	90	90	90
Perda suplementar (W)	84,654	70,749	44,186	19,09	3,975
Total (W)	3,75	3,45	3,15	2,85	2,55

Tabela 4 – Relação das perdas internas para cada ponto de carga.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Potência de entrada (W)	3803	3442	2732	1803	853
Perdas totais (W)	1044,519	852,57	581,72	369,381	257,561
Potência de saída (W)	2758,481	2589,43	2150,28	1433,619	595,439
Rendimento ($\eta\%$)	75,53%	75,23%	78,70%	79,51%	69,80%

Tabela 5 – Determinação do rendimento percentual.

4.3 Avaliação do Rendimento com Distorção Harmônica

A caracterização da presença de harmônicos pode ser feita através do tratamento individual ou total. A distorção harmônica total representa a ação conjunta de todas as frequências harmônicas presentes nos sinais de tensão e/ou de corrente, expressa por uma composição quadrática das distorções individuais. Em se tratando de tensões, a distorção harmônica pode ser determinada da seguinte forma:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_f} \quad (7)$$

Onde:

DHT_V – Distorção harmônica total de tensão.

V_h - Tensão harmônica individual de ordem h .

V_f – Tensão na frequência fundamental.

Em motores de indução trifásicos, a presença de conteúdo harmônico na tensão de alimentação provoca a elevação das perdas no cobre e no ferro. A elevação das perdas no ferro é consequência de maiores níveis de correntes parasitas nas chapas do rotor e do estator e da geração de calor adicional no ferro da máquina (Isoni). As perdas no cobre também são consideráveis, por conta de variações na resistência do enrolamento e do aumento da corrente eficaz total. O acréscimo de perdas é refletido na diminuição do rendimento e da vida útil da máquina.

Os ensaios efetuados na plataforma experimental com inserção de harmônicos de tensão tiveram como objetivo principal a verificação experimental do rendimento do MIT. A fonte programável foi configurada para inserir uma de 10% e o motor foi acionado com carga nominal. A Tabela 6 mostra os valores eficazes dos harmônicos inseridos na forma de onda da tensão e a Tabela 7 apresenta as medições efetuadas durante a realização do ensaio.

Ordem harmônica	Percentual	Valor eficaz
Fundamental	100%	220 V
5	8%	17,6 V
7	5%	11 V
11	3%	6,6 V
13	1%	2,2 V
17	1%	2,2 V

Tabela 6 – Valores eficazes de harmônicos de tensão.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (V)	220	220	220
Corrente (A)	8,004	8,211	8,318
Potência de entrada (W)	804	815	844
Fator de potência	0,79	0,78	0,80
DHT_v	9,91	9,91	9,91
DHT_i	15,62	15,39	15,23

Tabela 7 – Valores eficazes de harmônicos de tensão.

Os valores apresentados na Tabela 7 indicam que uma distorção total de tensão de 10% origina uma distorção harmônica total na corrente em torno de 15%. Para esse ensaio, o valor do rendimento encontrado foi de 59,62%, calculado conforme (Oliveira, 2018) e (ABNT, 2018). Se comparado com o valor encontrado para carga nominal (Tabela 1), é possível constatar que houve redução de mais de 25%, o que comprova que a presença de harmônicos eleva significativamente as perdas internas.

5 | CONCLUSÕES

O estudo do rendimento dos motores de indução trifásicos para vários pontos de carga permite avaliar o funcionamento da máquina sob a perspectiva das perdas internas, além de reproduzir e investigar situações operacionais diversas, como a presença de harmônicos, que podem ocorrer em ambientes industriais.

O cumprimento das recomendações contidas nas normas técnicas do segmento de máquinas elétricas garante qualidade, segurança e eficiência para os diversos sistemas. O consenso sobre a utilização das normas assegura o bom funcionamento dos motores e a segurança de pessoas e equipamentos, buscando minimizar ou evitar possíveis avarias.

A plataforma experimental desenvolvida pode ser utilizada para ensaios de motores novos, rebobinados ou ainda os que já estão sendo utilizados por algum tempo nas instalações industriais. A garantia de motores eficientes em processos industriais reduz significativamente as perdas de carga e contribui para minimizar os custos operacionais, uma vez que a correta seleção do motor elétrico para determinada aplicação é fator determinante no custo de sua operação.

REFERÊNCIAS

ABNT – **Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 17094-3:2018: Máquinas elétricas girantes – Parte 3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro.

Bulgarelli, R. (2006). **Proteção Térmica de Motores de Indução Trifásicos Industriais.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Chapman, S. J. (2013). **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** 5 ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.

Godoy, W. F.; Silva, I. N.; Goedel, A.; Palácios, R. H. C. e Lopes, T. D. (2016). **Application of intelligent tools to detect and classify broken rotor bars in three-phase induction motors fed by an inverter.** IET Electric Power Applications, Vol. 10, No. 5, p. 430-439.

Isoni, M. (n. d.). **A moderna eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas: Distorções harmônicas – Uma revisão de conceitos gerais.** [pdf] Disponível em: http://www.engeparc.com.br/cariboost_files/4-Harmonicas.pdf [Acesso em 29/05/2018].

Izhar, T.; Ali, M. e Nazir, A. (2017). **Development of a Motor Test Bench to Measure Electrical/Mechanical Parameters.** 2017 International Conference on Energy Conservation and Efficiency, p. 22-23.

Oliveira, C. A. (2018). **Plataforma para Ensaios de Motores de Indução Trifásicos e Simulação de Cargas Mecânicas: Acionamento, Operação e Monitoramento com Auxílio de Fonte Programável.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.

Rezende, P. H. O. e Bispo, D. (2015). **Análise Econômica em Motores de Indução Trifásicos.** Revista Horizonte Científico, Vol. 9, No. 1.

Silva, S. F. (2007). **Identificação de Torque de Carga em Motores de Indução usando Abordagem Baseada em Sistemas Fuzzy.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

Silva, V. P. (2012). **Análise Comparativa do Desempenho do Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento e Linha Padrão em Condições de Alimentação Ideal e não Ideal.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.

WEG (2017). **Cartilha WEG – Gestão Eficiente da Energia Elétrica: Motores Elétricos, Inversores de Frequência e Geração Solar.** [online] Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cartilha-weg-uso-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-catalogo-portugues-br.pdf> [Acesso em 07/04/2018].

ÍNDICE REMISSIVO

A

AMI 1, 2, 3, 4, 5, 7, 12, 124

Aneel 6, 52, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 81, 84, 96, 127, 136, 209, 221

Aterramento 25, 27, 28, 29, 32, 34, 37, 38, 72, 77, 209

Automação 1, 7, 25, 26, 32, 33, 37, 61, 138, 149, 164, 168, 169, 325, 330, 333, 341

C

Classificação 1, 12, 126, 128, 131, 134, 135, 136, 184, 209

Compatibilidade Eletromagnética 25

Complexo Hospitalar 83, 84

Consumo de Energia 4, 83, 84, 138, 161, 172, 181, 259, 260

Curto-Circuito 65, 100, 126, 128, 131, 132, 133, 134, 135, 234

D

Danos Elétricos 71, 72, 73, 76, 80, 82

Defensivos agrícolas 138, 139, 140, 146, 147

Densidade de potência 13, 15, 16, 17, 19

Descargas atmosféricas 27, 71, 76, 328

Detecção de fraudes 1, 10, 11

Distribuição de Energia Elétrica 72, 81, 96, 112, 113, 125, 127, 210, 221, 222

DPS 71, 72, 77, 78, 79, 80, 81

E

Ensaio 97, 98, 99, 103, 104, 108, 109, 111, 219, 324

Estudo comparativo 13, 15, 275

I

IEC 61850 54, 55, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 70, 207, 330, 331, 332, 333, 339, 340, 341, 342

Inteligência Artificial 112, 114

Interferência Eletromagnética 25, 26, 37, 327, 328

L

Linhas de transmissão 54, 56, 62, 64, 65, 112, 113, 227, 240, 327

M

Medição 1, 3, 4, 7, 8, 11, 54, 58, 59, 60, 64, 79, 80, 83, 84, 86, 87, 88, 89, 95, 96, 106, 138,

140, 141, 142, 217, 218, 219, 220, 221, 271, 272, 331, 338

Medidores Inteligentes 1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Mensuração da área de cobertura 138, 139, 140

Modelagem de sistemas de potência 39, 228

Motor de indução 13, 14, 19, 97, 98, 100, 101, 102, 104

Motor de indução trifásico 97, 98, 100, 101, 104

N

Normas Técnicas 81, 97, 99, 110, 111

P

Previsão de Demanda 112, 113, 114, 115, 119, 124, 125

Previsão de Séries Temporais 112

Projetos de Engenharia 25

Proteção de linhas de transmissão 54

Proteção Diferencial 54, 55, 56, 57, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 69

Q

Qualidade de energia 1, 11, 76, 96, 126, 127, 128, 217

R

Redes Neurais Artificiais 112, 115, 126, 128, 136

Rendimento 15, 16, 19, 20, 95, 97, 98, 101, 102, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 301

Ressarcimento 71, 72, 81, 82

S

Sampled Values 54, 55, 61, 70, 331

Smart Grid 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12, 192, 193, 195, 207, 341

Subestação 29, 83, 84, 95, 96, 112, 115, 116, 124, 331

T

Tecnologias de aplicação 138, 139, 140

Termoeletricidade 39

Transformador 83, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 132, 212, 213, 221, 313, 337

Turbina a gás 39

Turbogerador 39

V

Veículo elétrico leve 13

Viabilidade Técnica 13, 14, 16